

同轴五反大视场多目标三维成像光学系统设计

刘莹奇, 骆媛, 鲁华, 梅甫麟, 舒营恩

西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

摘要 对于远距离、大视场、多个运动目标的光电跟踪, 现有光学系统形式难以同时兼顾大口径、大视场与高角分辨率的要求。通过模仿人眼小凹转动视觉生理机制, 设计了一种轻型物方扫描校正镜组, 具有中红外成像与激光测距的共口径同轴五反式新型光学系统。该光学系统主镜口径为 1000 mm, 瞬时扫描有效口径为 600 mm, 最大视场角达到 20.7°, 中波红外成像传感器像元角分辨率优于 13 μrad , 激光测距单元作用距离达到 20 km。该新型光学系统具有大视场范围, 可同时对 6 个以上远距离高速运动目标进行跟踪。

关键词 几何光学; 反射式光学系统设计; 同轴五反; 小凹转动; 三维成像; 大视场; 多目标

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0608001

Design of Wide Field-of-View and Multi-Targets 3D Imaging Optical System with Coaxial Five Mirrors

Liu Yingqi, Luo Yuan, Lu Hua, Mei Fulin, Shu Ying'en

Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Concerning to long-range, wide-field and multi-targets electro-optical tracking system, it is difficult to take account of the requirements of large-aperture, wide field-of-view and high angular resolution at the same time in the form of existing optical systems. By mimicking the visual physiological mechanism of the roving fovea of human eye, a new common aperture coaxial five mirrors medium wave infrared (MWIR) imaging and laser radar optical system with light-weighted object orientation scanning corrector optics is designed. The primary mirror aperture of this optical system is 1000 mm, the instantaneous scanning effective aperture is 600 mm, the maximum field-of-view angle is 20.7°, the angular resolution of the MWIR imaging sensor is higher than 13 μrad , and the operating distance of the laser radar reaches 20 km. The new optical system has wide field-of-view, which can track more than six long-range fast-moving targets at the same time.

Key words geometric optics; reflective optical system design; coaxial five mirrors; roving fovea; 3D imaging; wide field-of-view; multi-targets

OCIS codes 080.4035; 220.2740; 220.3620; 220.1010

1 引言

光学系统的视场角与成像分辨率始终是一对严重冲突的性能参数。具有较强成像识别能力的光学系统, 通常采用大口径同轴双反射式或者同轴三反射式光学系统, 其视场角非常有限^[1], 且具有较大的转动惯量, 限制了传统光电系统的多目标快速跟踪能力。离轴三反长焦距光学系统仅具有长条形的大视场, 尤其适合航天器的推扫成像, 但在大多数领域其应用受到限制^[2]。作为一种非机械式的光束偏转

技术, 光学相控阵技术具备重量轻、功耗小的优势, 具有灵巧、光束方向控制精度高的特点, 可以实现随机指向、步进和任意驻留等能力, 但电光偏转器件口径偏小, 远距离应用能力较弱^[3]。目前, 对于远距离、大视场、多个快速运动目标的光电跟踪还具有很大的困难^[4]。

本文模仿人眼小凹随关注点快速转动产生的视觉生理机制, 设计了一种多谱段共口径新型无焦式同轴五反光学系统, 该系统采用新型四反式库德光路, 激光器测距与红外传感器部分不随大口径光学

收稿日期: 2017-10-13; 收到修改稿日期: 2017-12-16

基金项目: 海军装备预先研究项目(2016047/3008)

作者简介: 刘莹奇(1984—), 男, 博士后, 高级工程师, 主要从事新型光电跟踪技术光学系统方面的研究。

E-mail: a1032510210@126.com

系统一起运动。该新型光学系统设计形式使光电跟踪系统同时具有大视场、高角分辨率、高角速度、高角加速度、快速响应、多目标高精度跟踪与高精度稳定等特点。

2 基本原理

人眼视觉最敏感区域黄斑小凹对应的视场不到 1° ，但人类通常感觉其自身能实时感知大于 100° 视场的能力，这种视觉效应是由于人眼小凹随关注点快速转动产生的^[5-8]，如图1所示。

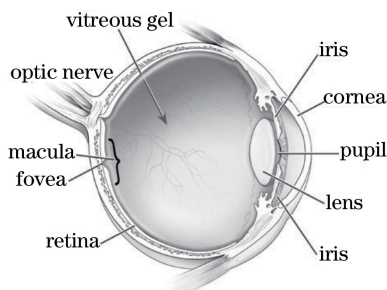


图1 人眼视网膜黄斑中央凹示意图

Fig. 1 Schematic of retinal macular fovea of human eyes

通过模仿这种视觉生理机制，本研究设计了一种轻型物方扫描校正镜组且具有中红外成像与激光测距单元的多谱段共口径新型光学系统，该系统由大口径同轴五反主光学系统、四镜式随动补偿运动库德光路、中波红外(MWIR)成像传感器、激光测距单元组成。共口径主光学系统主镜采用大尺寸深焦比球面主镜(相当于人眼视网膜感光区)。由几何光学像差理论可知，当光学系统的孔径光阑位于球面主镜球心处时，主镜在其对称轴上点会产生大量的球差，轴外点产生球面状的匹兹凡像面弯曲(其曲率中心与主镜球心重合)。因此，校正镜组在扫描运动的各个瞬时位置，系统的像差分布情况一致，校正镜组在各扫描位置光学系统结构形式一致。围绕球面主镜球心做扫描运动的校正镜组(相当于随关注点作快速转动的人眼小凹)安装在细长轻质管状结构里，以降低系统的遮拦与减小扫描运动的转动惯量。系统原理如图2所示。

库德镜组由四片式反射镜组成，分成两对，每对之间互成 45° ，两对镜分别随动于两轴运动万向架相对运动，起到将扫描运动光束动态补偿引到运动万向架上固定位置传感器的作用，如图3所示。

3 系统性能指标分析

大口径主光学系统采用无焦同轴五反形式，便

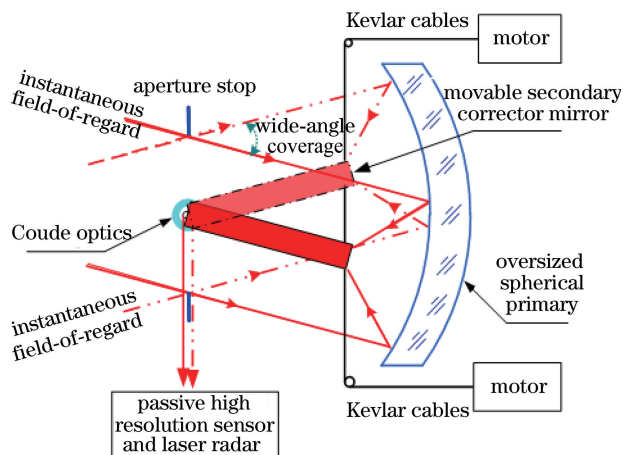


图2 人眼小凹旋转光学系统原理图

Fig. 2 Schematic of roving fovea optical system

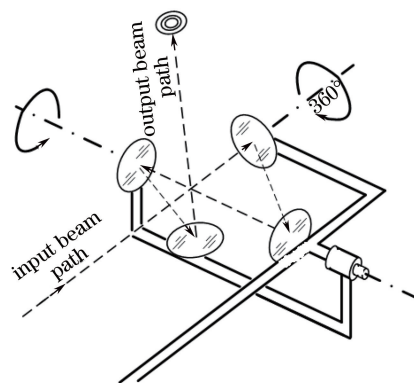


图3 四镜式库德光路示意图

Fig. 3 Schematic of four-mirror Coude optics

于与中波红外成像传感器、激光测距单元的相互对接和各自调焦，且可以避免宽谱段色差校正问题。校正镜组光路主要考虑了两种反射形式，如图4所示。

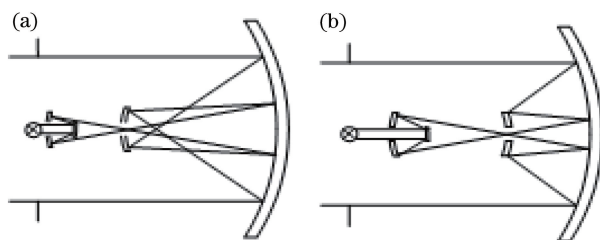


图4 共口径主光学系统校正镜组形式。
(a)次镜放大率为正；(b)次镜放大率为负

Fig. 4 Reflective corrector of common aperture main optical system. (a) Magnification of the secondary mirror is positive; (b) magnification of the secondary mirror is negative

光电系统主要性能指标参数要求如表1所示。经研究分析得出光电系统主要性能指标参数与光学结构参数的相互关系，如表2所示。在其他光学参数保持不变的情况下：主镜口径越大，系统视场角

表 1 光电系统主要技术指标参数

Table 1 Mean technical parameters of electro-optical system

Parameter	Value
Range	1-20 km
Field-of-regard	$\geq 20^\circ$
Target number	≥ 6
Camera bandpass	3-5 μm
Laser bandpass	1.55 μm
System resolution	$\leq 15 \mu\text{rad}$
Update rate	$\geq 30 \text{ Hz}$

表 2 系统技术参数与光学结构参数的关系

Table 2 Relationship between the technical parameters of the system and optics parameters

Technical parameter	Optics parameter				
	Primary aperture	Instantaneous primary aperture	Primary F number	Secondary aperture	Secondary magnification
Field-of-regard	Ratio	—	—	—	—
Instantaneous field-of-regard	—	Inverse ratio	Ratio	Ratio	Inverse ratio
System obstruction	—	—	—	Ratio	Ratio
Update rate	—	Inverse ratio	Inverse ratio	Inverse ratio	Ratio
System aberration	—	Ratio	Inverse ratio	Inverse ratio	Ratio
System resolution	—	Ratio	—	—	—

校正镜组次镜放大率为负,系统光阑设置在球面主镜球心位置,主光学系统出瞳设置在四镜附近。大口径主反射镜采用具有较高比刚度、70%轻量化率的超低膨胀玻璃(ULE)光学材料,以减轻主镜支撑结构的重量。支撑结构及镜筒采用新型石墨复合材料,以降低温度变化对大口径反射镜的光学性能影响。反射式校正镜组光机结构材料采用铝,铝反射镜及光机支撑结构采用单点金刚石车削工艺进行高精度加工。

4 设计结果与分析

同轴五反式主光学系统像差校正过程为:首先,将高次非球面设置在与系统孔径光阑位置共轭附近的次镜上,有效校正球面主镜产生的大量初级与高级球差;其次,保证校正镜组次镜平衡一部分球差之后,轴上球差在 100 个波长以内,使各个视场的光线无遮挡地通过次镜中心孔,并得到良好的轴上像质;然后,合理约束三、四镜位置,尽可能减小四镜对视场光线的拦截;接下来采用高次非球面四镜,进一步校正系统的彗差、像散和残余高级球差;最后,对系统结构参数与像差进行平衡,以达到设计要求的像质。共口径主光学系统的设计光路如图 5 所示,共口径主光学系统设计和结构参数分别如表 3、表 4 所示。

共口径主光学系统设计光程差曲线如图 6 所示,在参考波长 4 μm 处,无焦系统全视场光程差在

越大;主镜瞬时有效口径越大,系统瞬时有效视场角越小,扫描成像频率越低,像差越大,分辨率越高;主镜 F 数越大,系统瞬时有效视场角越大,扫描成像频率越低,像差越小;次镜口径越大,系统瞬时有效视场角越大,遮拦越大,扫描成像频率越低,像差越小;次镜放大率越大,系统瞬时有效视场角越小,遮拦越大,扫描成像频率越高,像差越小。

综合考虑视场角、系统遮拦、转动惯量、探测识别能力等,校正镜组采用图 4(b)所示光路形式,即

0.5 个波长以内,轴上视场波前误差均方根值为 0.035 个波长,优于 1 倍的衍射极限。

中波红外成像传感器与激光分光采用倾斜平板

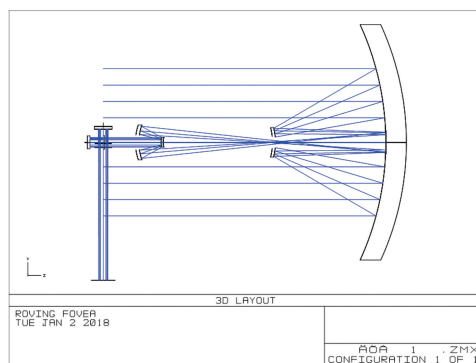


图 5 共口径主光学系统设计光路

Fig. 5 Designed optical path of common aperture main optical system

表 3 共口径主光学系统设计参数

Table 3 Designed parameters of common aperture main optical system

Parameter	Value
Primary aperture	1000 mm
Primary F number	0.59
Instantaneous primary aperture	600.00 mm
Secondary aperture	108.16 mm
Secondary magnification	-40.4
Field-of-regard	20.7°
Instantaneous field-of-regard	0.26°
System obstruction	0.18

表 4 共口径主光学系统结构参数

Table 4 Configuration parameters of common aperture main optical system

Item	Radius /mm	Thickness /mm	Aperture /mm	Aspheric order
Primary	-1180.00	-469.99	600.00	— 4 th oder term: -2.776×10^{-8} 6 th oder term: -2.989×10^{-12}
Secondary	-246.11	-1043.49	108.16	8 th oder term: 3.117×10^{-16} 10 th oder term: -1.189×10^{-19}
Tertiary	237.24	100.80	144.49	— 4 th oder term: -2.076×10^{-7} 6 th oder term: -6.726×10^{-10}
Quaternary	105.08	—	39.24	8 th oder term: 5.407×10^{-14} 10 th oder term: -2.173×10^{-15}

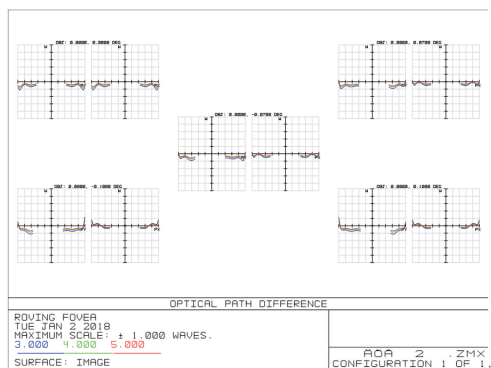


图 6 共口径主光学系统光程差

Fig. 6 Optical path difference of common aperture main optical system

型二向色镜分光,分光平板反射 3~5 μm 中波红外波段激光,透射 1.55 μm 激光,如图 7 所示。激光发射与接收采用偏振分光方式,激光通过 λ/4 波片和偏振耦合棱镜进行偏振光 S 光与 P 光的分光,激光发射经偏振耦合棱镜反射进入共口径全反射光学系统,然后投射在远距离目标上;被目标散射的激光回波经偏振耦合棱镜透射,然后经过窄带滤光片及后续会聚镜组到达雪崩光电二极管(APD),完成激光接收。

根据制冷式红外光学系统的特点,中波红外成

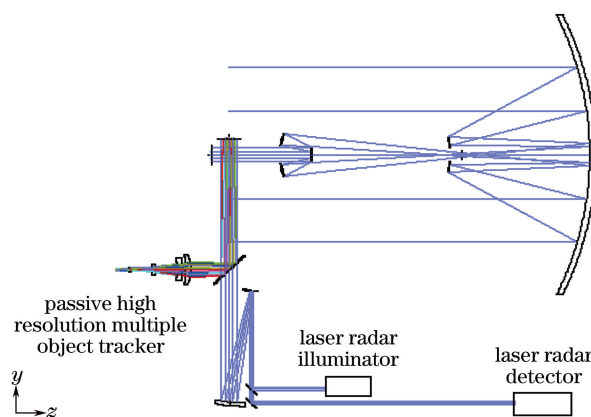


图 7 系统光路布局

Fig. 7 Optical path diagram of the system

像传感器采用二次成像的光学系统形式,实现 100% 的冷光阑效率,探测器冷屏作为系统出射光瞳,透镜材料采用硅和锗,如图 8 所示。中波红外成像传感器设计参数如表 5 所示。

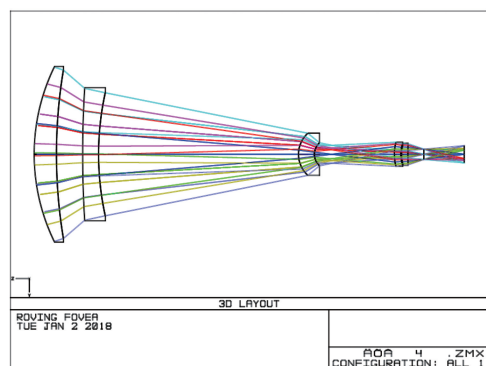


图 8 中波红外成像传感器设计光路

Fig. 8 Designed optical path of MWIR imaging sensor

表 5 中波红外成像传感器光学设计参数

Table 5 Optical design parameters of MWIR imaging sensor

Parameter	Value
System F number	4
Focal length	2400 mm
Field-of-regard	0.26°
Detector type	InSb
Bandpass	3-5 μm
Active pixel	320 × 256
Pixel size	30 μm
Instantaneous field of view	12.5 μrad/pixel

中波红外成像传感器各视场调制传递函数(MTF)曲线如图 9 所示,在奈奎斯特频率为 17 lp/mm 处 MTF 高于 0.4。各视场能量集中度曲线如图 10 所示,系统能够以接近 80% 的能量集中在探测器上半径为 30 μm 的圆内。在一定范围内优化系统光学零件曲率使得各表面 YNI(其中 Y

是边缘光线的投射高, N 是折射率, I 是边缘光线的入射角度) 大于或接近 1, 以减小冷像对系统的影响。

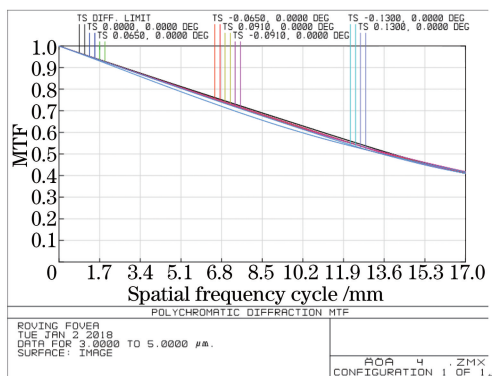


图 9 中波红外成像传感器的 MTF
Fig. 9 MTF of MWIR imaging sensor

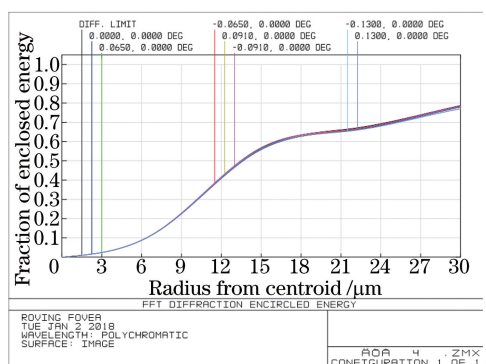


图 10 中波红外成像传感器能量包围曲线
Fig. 10 Enclosed energy curve of MWIR imaging sensor

激光测距单元采用离轴双抛物面形式, 可避免遮拦并有效校正轴上视场像差, 如图 11 所示。激光测距单元设计参数如表 6 所示。

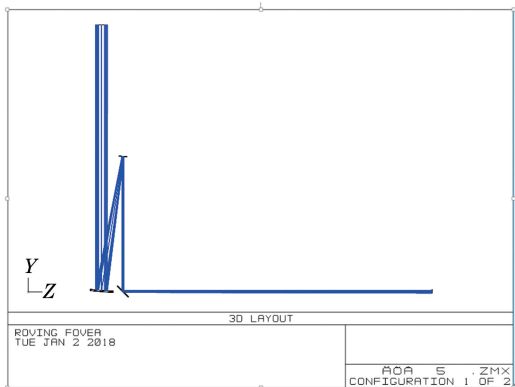


图 11 激光测距单元设计光路
Fig. 11 Designed optical path of laser ranging unit

激光测距单元波前误差如图 12 所示, 在参考波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 轴上视场波前误差均方根值为 0.043 个波长, 优于 1 倍的衍射极限。

表 6 激光测距单元的光学设计参数

Table 6 Optical design parameters of laser ranging unit

Parameter	Value
Laser type	Optical parametric oscillator shifted Nd:YAG
Wavelength	$1.55 \mu\text{m}$
Beam divergence	$20 \mu\text{rad}$
Output pulse energy	$\geq 50 \text{ mJ}$
Beam magnification	$20\times$
Range	1-20 km
Detector type	InGaAs APD

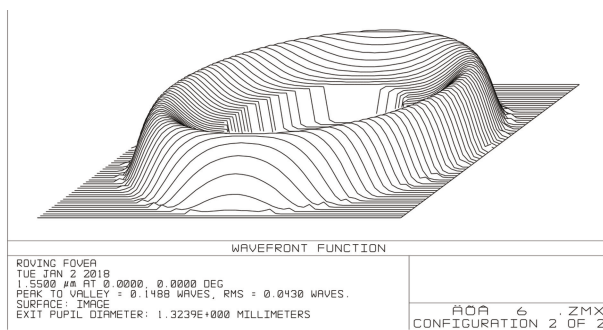


图 12 激光测距单元波前误差
Fig. 12 Wavefront error of laser ranging unit

5 结 论

目前, 基于对生物某些优异功能的模仿和集成, 催生了大量先进的光电成像系统概念。本研究对新型光学系统的特点和设计关键问题进行了简明阐述, 光学设计结果及分析表明, 新型多波段共口径光学系统采用了同轴五反与运动补偿式四镜库德光路等创新方案, 原理可行, 结构紧凑, 遮拦小, 光学像质优良, 满足系统指标的要求, 不存在严苛的光学工艺问题, 可用于多目标三维跟踪成像以及激光光束控制等领域, 具有较好的应用前景。模仿人眼小凹转动设计的轻型物方校正镜组(次镜放大率为负)扫描方式, 不但能提高光电系统的多目标跟踪能力, 还能提高对单目标跟踪的角速度和角加速度, 特别适合稳定性较差的平台, 如固定翼飞机、直升机、舰载和车载等动基座平台, 能够显著提升光电跟踪系统的性能。下一步将开展该新型光学系统在近红外成像波段的应用研究, 以进一步提高该系统的远距离目标识别侦察能力。

参 考 文 献

[1] Hu B, Yang Z J, Chen J, *et al.* Assistant alignment lens design for catadioptric infrared optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(6): 864-867.

- 胡博, 杨子建, 陈皎, 等. 用于折反式红外光学系统的辅助装调镜设计[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 864-867.
- [2] Zhang C, Wei X M, Zhao X T, *et al.* Computer-aided alignment technology of multi-spectral camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0812005.
张超, 魏学敏, 赵希婷, 等. 多光谱相机计算机辅助装调方法[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0812005.
- [3] Cui N D, Kou J T, Zhao H, *et al.* Optical true time-delay lines of photonic crystal slow light waveguides used in phased array radar [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0616001.
崔乃迪, 寇婕婷, 赵恒, 等. 应用于相控阵雷达的光子晶体慢光波导光实时延迟线[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0616001.
- [4] Chang W J, Chen J, Zheng C Q. Optical design of common path for laser receiving/visual collimator [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 267-270.
常伟军, 陈皎, 郑常青. 用于激光接收/目视瞄准镜的共光路光学系统设计 [J]. 应用光学, 2016, 37(2): 267-270.
- [5] Feng C, Chang J, Yang H B. Design of dually foveated imaging optical system [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 034201.
冯驰, 常军, 杨海波. 双小凹光学成像系统设计 [J]. 物理学报, 2015, 64(3): 034201.
- [6] Lü F X, Chang J, Zhang Y Q. Design of infrared foveated imaging system based on bionic eye [J]. Aero Weaponry, 2016, 3(6): 49-53.
吕凤先, 常军, 张运强. 基于仿生眼的红外小凹成像系统设计 [J]. 航空兵器, 2016, 3(6): 49-53.
- [7] Wick D V, Martinez T, Restaino S R, *et al.* Foveated imaging demonstration [J]. Optics Express, 2002, 10(1): 60-65.
- [8] Zhao X X, Xie Y J, Zhao W. Foveated imaging system design based on space-earth flat [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 35(11): 2890-2894.
赵小侠, 谢永军, 赵卫. 基于天基平台的小凹成像系统的设计 [J]. 光子学报, 2009, 35(11): 2890-2894.